第 41 卷 第 3 期 天 文 学 进 展 Vol. 41, No. 3
2023 年 9 月 PROGRESS IN ASTRONOMY Sept., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.03.05

基于 LAMOST 数据的 Sequoia 子结构研究

王煜坤[1,2]，赵景昆[1]，赵 刚[1,2]，陈玉琴[1,2]，张浩鹏[1,2]，叶先豪[1]，杨 勇[1,2]

(1. 中国科学院 国家天文台 光学天文重点实验室，北京 100101； 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院，北京 100049)

摘要： Sequoia 是一个逆向旋转的子结构，来自于一个矮星系与银河系的并合事件。首先介绍了 Sequoia 的发现，综合分析了不同文献对这个子结构在相空间的限制及其化学性质等。随后，利用 LAMOST DR8 光谱数据结合 Gaia EDR3 的天测数据，建立了包含空间位置、速度和金属丰度的样本，利用这个样本，首先根据文献中的选源标准对 Sequoia 子结构进行了分析，再利用 HDBSACN 聚类算法独立地分离出这个子结构，并进行细致的分析，然后比较了它与 Gaia-Enceladus-Sausage (GES) 化学性质。整体上 Sequoia 子结构比 GES 结构具有更贫的金属丰度，更低的 α、Al 和 Ni 丰度等，但是利用低分辨率光谱得到的其他元素丰度在这两个子结构很难看出明显的区别，精确地确定这个子结构的化学丰度模式需要更大规模的高分辨率光谱后继观测数据。

关 键 词： Sequoia；银晕；子结构；丰度

中图分类号： P156.5 **文献标识码：** A

1 引 言

根据冷暗物质模型，银河系在层级并合形成过程中会产生丰富的相空间结构，这些结构从早期的空间成团星流，逐步演化为运动学和化学子结构，对这些子结构进行运动学、化学以及动力学演化研究对于我们理解银河系的形成具有重要的意义。目前发现了许多并合事件，其中，GES 是形成银晕的最主要的并合事件的遗迹，其前身星系的恒星质量约为 $(10^{8.85} \sim 10^{9.85})M_\odot$[1]。

收稿日期： 2022-10-09； **修回日期：** 2023-01-10

资助项目： 国家自然科学基金 (11988101, 12273055, 11973048, 11927804, 11890694)；科技部重点研发 (2019YFA0405500)

通讯作者： 赵景昆，zjk@nao.cas.cn

除了 GES 外，另外一个吸积事件 Sequoia 子结构也被发现。2019 年，Myeong 等人发现，银晕中几个贫金属、逆行的球状星团很可能起源于一个被银河系吸积的矮星系，他们用 Sequoia 一词来描述这一吸积事件[2]。他们估计 Sequoia 前身星系的恒星质量约为 $5\times10^{7}M_{\odot}$，而总质量约为 $10^{10}M_{\odot}$。虽然明显比 GES 小，但 Sequoia 有独特的化学动力学特征，其成员星是逆向运动的，典型的偏心率约为 0.6，而 GES 速度在 0 附近，主要是在径向轨道上运行。平均而言，与 GES 成员星相比，Sequoia 成员星有更贫的 [Fe/H]，比 GES 低约 0.3 dex。而在相同的 [Fe/H] 下，Sequoia 有更高的元素丰度，例如在 [Fe/H]=−1.5 时，Sequoia 的 [Al/Fe] 要高于 GES。他们推测 Sequoia 和 GES 可能是在一个相同的时期相互关联并被吸积的。

此后，关于 Sequoia 的研究逐渐开展起来，然而，它的属性一直存在争议。这个子结构主要提供了银晕中高能量逆行旋转的恒星，但是目前对于这个子结构的吸积并合事件的性质了解并不深入。利用已知的巡天数据，包括 LAMOST[3]、Gaia[4]、APOGEE[5],、RAVE[6]等，证认 Sequoia 子结构的成员星，研究这个子结构和已知的一些小的逆行旋转的子结构的关系，并对其成员星进行化学、运动学分析，对我们深入理解这个子结构前身星系的性质以及整个并合历史具有重要的意义。

本文第 2 章介绍 Sequoia 子结构研究的发展趋势及现状；第 3 章针对前人的研究，参考他们的成员星选择标准，结合 LAMOST DR8 的数据进行了 Sequoia 与 GES 的化学丰度比较，提出不同的成员星选择标准可能对结果产生影响；第 4 章进一步讨论 HDBSCAN 聚类算法对于团块的选择，并进行化学丰度的分析；第5章进行了总结和展望。

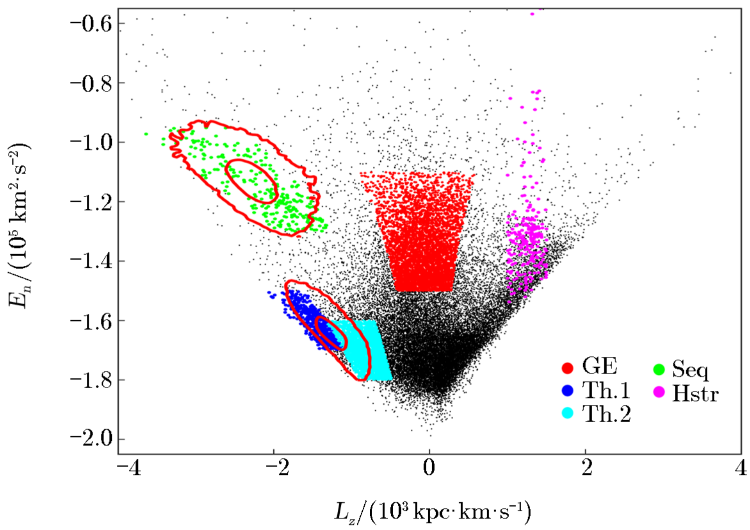
2 研究现状

近年来，对于 Sequoia 子结构的研究围绕运动学和化学性质展开。在 Sequoia 成员星的选择和定义上，也出现了不同的标准。Koppelman 等人[7]及 Matsuno 等人[8]通过角动量 (L_z) 和轨道能量 (E) 来选择成员星；Myeong 等人[2]及 Feuillet 等人[9]则通过作用量 (J) 来选择。

利用 Gaia 提供的天体测量数据，Myeong 等人[2]指出，Sequoia 和 GES 在作用量分布上有着明显的区别：Sequoia 逆行，$J_\phi/J_{\rm tot} < -0.5$ (J_ϕ 为方位角作用量，$J_{\rm tot}$ 为方位角作用量、垂直作用量和径向作用量的绝对值之和)；GES 则是 $|J_\phi/J_{\rm tot}| < 0.07$。利用 APOGEE DR14 数据，他们进一步指出，GES 与 Sequoia 具有不同的[Fe/H] 分布，GES 在 [Fe/H]=−1.3 处达到峰值，Sequoia 在 [Fe/H]=−1.6 处达到峰值。同时，他们还发现这两个子结构的 [Mg/Fe] 和 [Al/Fe] 低于银河系，而且彼此不同。

在这之后，为了更进一步认识 Sequoia 的性质，Koppelman 等人[7]建立了一个包含六维相空间信息的 8 738 322 颗恒星的样本，样本中的恒星具有较高的视差精度 (parallax_over_error >5)。样本中的恒星来自于 Gaia GVS、APOGEE、LAMOST 和 RAVE。其中，3 404 432 颗恒星具有 [Fe/H] 信息，189 444 颗恒星有化学丰度信息。他们利用 HDB-

SCAN 聚类算法证认了几个不同的子结构，发现 Sequoia 的轨道能量范围比之前估计的更小，并且局限于高能量。Sequoia 前身可能是一个质量较小的星系，但由于它在运动积分空间和化学丰度空间与 GES 的碎片重叠，它的性质还不能完全确定。他们指出，逆行晕可以进一步分为两部分 (由它们在 E-L_z 上的轨道能量值分开)。他们认为，高能量成分对应 Sequoia，而低能量群体可能与另一个被称为 Thamnos 的吸积事件有关。图 1 展示了 Koppelman 工作中各成员星在 E_n-L_z 空间的分布，其中 E_n 为总能量，对应本文中的能量 E，等高线表明模拟矮星系的范围放置在 Sequoia 和 Thamnos 1 与 2 的残骸上。矮星系的内部轮廓 $M_* = 5 \times 10^6 M_\odot$，外部轮廓 $M_* = 10^8 M_\odot$。



注：其中等高线表明模拟矮星系的范围放置在 Sequoia 与 Thamnos 1 和 2 的碎片上。矮星系的内部轮廓 $M_* = 5 \times 10^6 M_\odot$，外部轮廓 $M_* = 10^8 M_\odot$[7]。

图 1　Koppelman 标准下各成员星 E_n-L_z 分布图[7]

2020 年，Naidu 等人[10]利用 H3 光谱巡天数据[11]结合 Gaia 的天测数据，建立了包含 5 684 颗巨星的样本，样本中的恒星银纬高于 40°，$|z| > 2$ kpc，证认出 high-α 盘、本地晕、Sagittarius、GES、Helmi 流、Sequoia 以及 Thamnos 子结构。他们发现，Sequoia 与另外的两个逆行子结构存在重叠，其特征是不同的 [Fe/H]，他们将其命名为 Arjuna 和 I’itoi，并把三个子结构放在一起研究。基于 H3 巡天中的元素丰度数据，他们发现 Sequoia 的平均 [Fe/H] 为 −1.6 dex，而包含大多数逆行高能成员星的 Arjuna 在 −1.2 dex 附近达到峰值，I’itoi 峰值低于 −2.0 dex。他们把 [Fe/H] $<$ 2 的部分归为 I’itoi，$-2 <$[Fe/H]< -1.6 归为 Sequoia，1.6 $<$[Fe/H]$<$ 1.2 归为 Arjuna。然而，这种分割的局限在于，他们无法根据这种选择标准讨论 Sequoia 在金属丰度上与 GES 的差别。

Feuillet 等人[9]利用 Gaia DR2 和 APOGEE DR16 数据测试了不同的 Sequoia 成员星选择条件，在 $-1.0 < (J_z - J_R)/J_{\rm tot} < 0.1$ 的条件下，他们以 $-1.0 < J_\phi/J_{\rm tot} < -0.4$ 为标准，选择 Sequoia 样本；以 $-1.0 < J_\phi/J_{\rm tot} < -0.6$ 为标准，选择 Sequoia06 样本。他们指

出，GES 和 Sequoia 样本在 [Fe/H] 低于 -1.3 时具有相似的 Mg 和 Al 丰度。当 [Fe/H] 大于 -1.3 时，Sequoia 样本弥散很大，表明丰度模式与选择成员星使用的运动学标准相关。较大的 Sequoia 样本在 [Mg/Fe] 和 [Al/Fe] 中发散，而 Sequoia06 样本主要含有高 [Mg/Fe] 和高 [Al/Fe] 恒星。他们认为，最有可能代表 Sequoia 成员星的平均金属丰度在 $-1.5 \sim -1.3$ dex 之间，这取决于去除污染的标准，而 [Fe/H]> -1.0 的恒星不太可能是 Sequoia 成员星。同时，他们指出，Sequoia 成员星候选体的数量很少，因此很难对成员星进行强有力的描述，使用作用量空间选择的恒星中有很大一部分不是成员星，因此在此空间中选择标准时应该谨慎。

为了精细地研究 Sequoia 的化学性质，Matsuno 等人[8]通过对高信噪比和高分辨率光谱进行差异丰度分析，指出 Sequoia 成员星与 GES 存在化学差异。在 $-1.8 <$[Fe/H]< -1.4 的金属丰度范围内，8 颗 Sequoia 成员星的 [Na/Fe]、[Mg/Fe]、[Ca/Fe]、[Ti/Fe]、[Zn/Fe] 和 [Y/Fe] 均低于 GES 的预期值。[Na/Fe] 和 [Mg/Fe] 丰度差约为 0.2 dex，其他丰度比约为 0.1 dex。他们认为，由于 Sequoia 子结构比 GES 小，其平均金属丰度也低于 GES，因此其前身星系可能是比 GES 前身星系小的瓦解的矮星系。

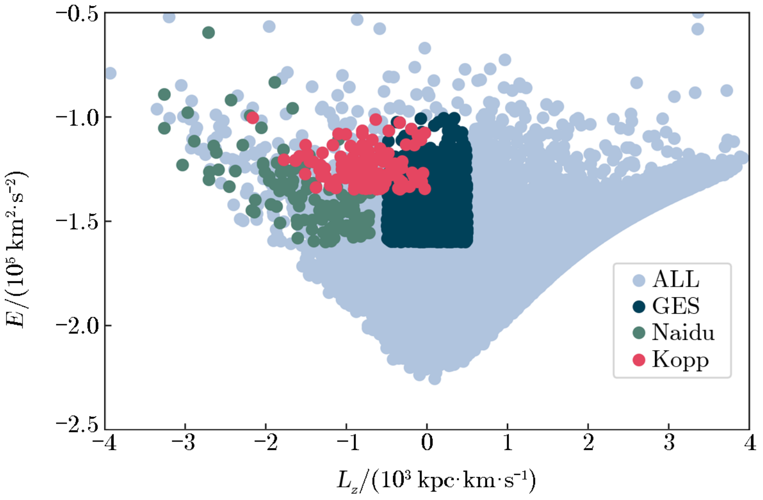
为了对 Sequoia 子结构的化学丰度进行全面的研究，Horta 等人[12]以前人在角动量能量空间 (L_z-E) 和作用量空间 (J) 的选择标准为基础，用 APOGEE 和 Gaia 数据进行了Sequoia 成员星的选择，同时与 GES 的成员星进行了丰度比较。Sequoia 样本与 GES 的定量比较表明 Sequoia 与 GES 具有相似的化学性质，这种化学相似性证实了 Koppelman 等人[13]提出的假设，即被认为是 Sequoia 的偏心率低、轨道逆行、能量相对较高的恒星可能是由 GES 并合产生的。同时，他们在 APOGEE 数据的基础上重复了 Matsuno 等人[8]的过程，发现在APOGEE 取样的化学空间中，Sequoia 与 GES 非常相似。他们指出，尽管需要进一步的数据和模型分析，但在化学成分数据上，Sequoia 与 GES 可能来自同一起源。

3 基于 LAMOST 数据的 Sequoia 分析

为了验证不同选择标准对结果的影响，我们将 LAMOST LRS DR8 与 Gaia EDR3 进行交叉匹配，建立了一个有 554 107 颗恒星的样本。利用 LAMOST DR8 提供的视向速度，Gaia EDR3 提供的位置、自行，以及 Anders 等人[14]基于 Gaia EDR3 计算的距离，计算出恒星在银心坐标系 (右手) 下的位置 x, y, z 和速度 v_x, v_y, v_z；然后，利用 Galpot 和银河系引力势，计算出样本恒星的轨道参数，包括能量 E、z 方向角动量 L_z、近心距 $R_{\rm pr}$、远心距 $R_{\rm ap}$、z 方向最大距离 $Z_{\rm max}$、导向半径 $R_{\rm g}$ 以及偏心率 e[15, 16]。其中，采用的太阳到银心的距离为 8.21 kpc，太阳位于银河系中平面之上 14 pc，太阳相对于 LSR 的运动速度为 11.1、12.24、7.25 $\rm km \cdot s^{-1}$，LSR 围绕银心的旋转速度为 233.1 $\rm km \cdot s^{-1}$。参考 Koppelman 等人[7]和 Naidu 等人[10]给出的 Sequoia 成员星选择标准来选择候选成员星，通过 LAMOST 提供的 [Fe/H] 和 [X/Fe] 等信息[17]，将 Sequoia 与 GES 进行了化学丰度比较。

为了比较哪种标准更能看出 Sequoia 与 GES 的差异，我们选择了两种不同的 Sequoia 成

员星选择标准。首先，根据 Koppelman 等人[7]的选择标准：$0.4 < \eta < 0.65$ (η 为圆度，计算公式由 Wetzel[18]提出，$\eta = \sqrt{1-e^2}$，e 为偏心率)，$1.35 < E < 1.0 \times 10^5\ \mathrm{km^2 \cdot s^{-2}}$，$L_z < 0$ 选出 Sequoia 成员星，用红色散点表示 (见图 2)。前面提到，Naidu 等人[10]提出，Sequoia 与另外的两个逆行子结构重叠，其特征是不同的 [Fe/H]，他们将其命名为 Arjuna 和 I'itoi，并把三个子结构放在一起研究。因此，在运动学选择标准的基础上，我们根据他们给出的 [Fe/H] 进一步把 Sequoia 从三个子结构中分离出来。即用 $\eta > 0.15$, $E > 1.6 \times 10^5\ \mathrm{km^2 \cdot s^{-2}}$, $L_z < 0.7 \times 10^3\ \mathrm{kpc \cdot km \cdot s^{-1}}$, 2 <[Fe/H]< 1.6 选出 Sequoia 成员星，用绿色散点表示。GES 则根据 Horta 等人[12]的选择标准 $|L_z| < 0.5 \times 10^3\ \mathrm{kpc \cdot km \cdot s^{-1}}$, $1.6 < E < 1.1 \times 10^5\ \mathrm{km^2 \cdot s^{-2}}$ 进行选择，用深蓝色散点表示 (仅根据 L_z 和 E 进行选择，红蓝样本交集处未作二次处理)。

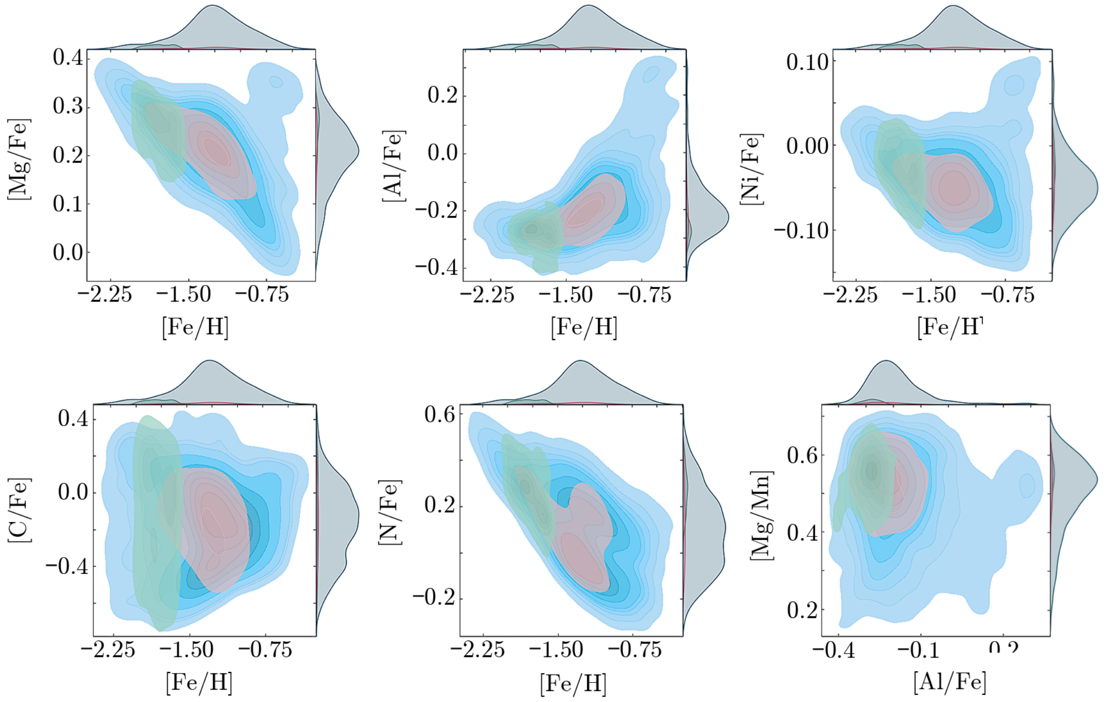


注：红色为 Koppelman 标准选出的 Sequoia 成员星，绿色为 Naidu 标准选出的 Sequoia 成员星，深蓝色为 GES 成员星，浅蓝色为全体样本。

图 2　Sequoia 与 GES 成员星角动量能量分布图

选出成员星后，利用 LAMOST DR8 提供的元素丰度信息对 Sequoia 与 GES 的化学丰度进行比对分析。我们分别比较了 Sequoia 与 GES 在 [Mg/Fe]、[Al/Fe]、[Ni/Fe]、[C/Fe]、[N/Fe] 和 [Mg/Mn] 的分布。如图 3 所示，可以看出，Koppelman 选择标准下的 Sequoia [Fe/H] 分布比 GES 稍窄，而 Naidu 选择标准中先行对 [Fe/H] 进行了分割，它的 Sequoia [Fe/H] 分布被固定在 2 < [Fe/H] < 1.6，明显比 Koppelman 选择标准下的 Sequoia [Fe/H] 分布窄，在对比中缺少参考价值。

可以看出，Koppelman 选择标准下的 Sequoia 的金属丰度总体低于 GES，但在密度分布上与 GES 的中心区域基本重叠，没有显著差异，无法根据丰度对 Sequoia 与 GES 进行区分。而 Naidu 选择标准下的 Sequoia 在相同的 [Fe/H] 区间与 GES 的金属丰度基本一致，且 Naidu 选择标准对金属丰度进行了分割，缺少参考价值。



注：绿色为 Naidu 标准选出的 Sequoia 成员星，红色为 Koppelman 标准选出的 Sequoia 成员星，蓝色为 GES 成员星。

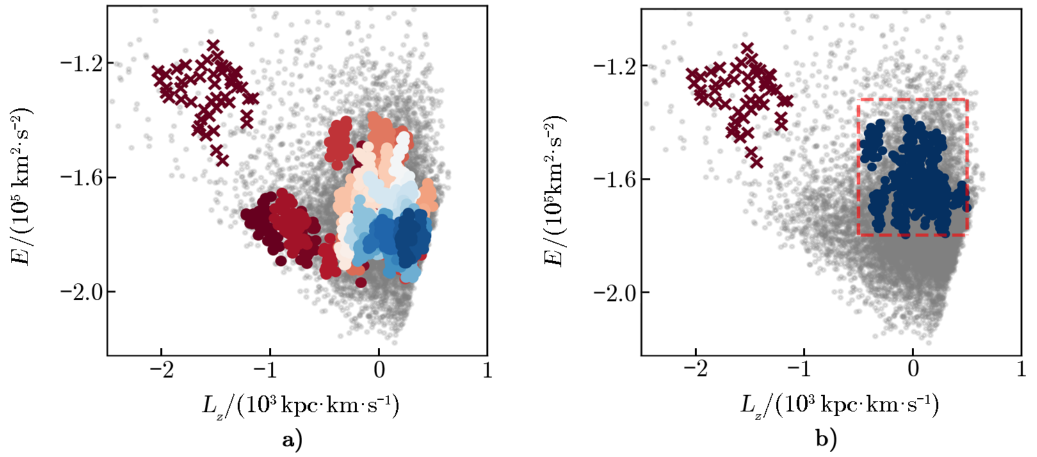
图 3　Sequoia 与 GES 化学丰度分布图

4　聚类选择

为了深入研究，我们使用聚类算法 HDBSCAN[19]来试图探测更纯粹的 Sequoia 结构。HDBSCAN 是指基于分层密度的噪声应用程序空间聚类，它不受密度分布的影响，能找到不同密度的聚类团块。我们设置 min_samples = 3, min_cluster_ size = 18 和 cluster_selection_ method = “leaf”，算法的其他参数为缺省值，我们使用 E, L_z, ecc 和 [Fe/H] 作为算法的输入数据，这些数据都是在恒星晕中寻找子结构时常用的[7, 20, 21]。我们选择了距离太阳 5 kpc 范围内的所有恒星并设定了 $|V-230|<180\ \mathrm{km\cdot s^{-1}}$ 的条件，目的是减少盘星的污染。

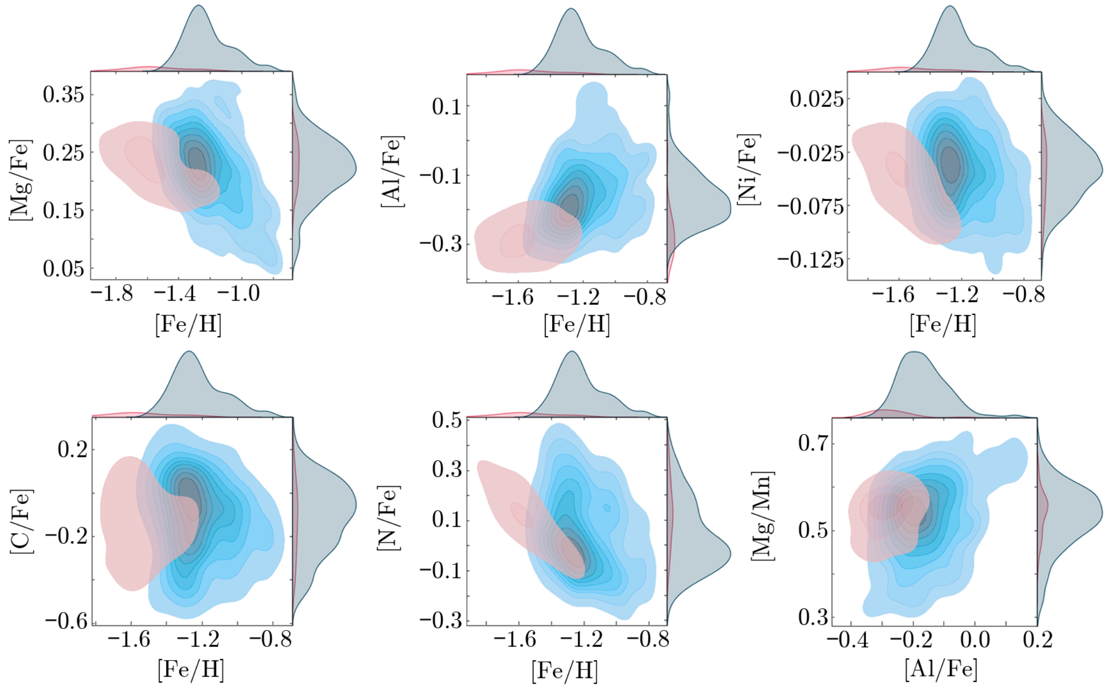
图 4 a) 展示了 HDBSCAN 算法发现的团块，根据算法给出的不同团块赋予不同颜色，每一种颜色代表一个团块。可以看到，在逆行、高能的区域有一个深红色的团块与其他的团块有明显分离，这个团块对应Sequoia 结构，我们用深红色 x 表示与其他结构进行区分。因为数据、引力势能量参数以及样本的不同，图 4 与图 1 中 Sequoia 和 GES 的分布区域、数量存在差异。我们用深蓝色标出所有成员星均满足 $|L_z|<0.5\times10^3\ \mathrm{kpc\cdot km\cdot s^{-1}}$, $1.8<E<1.3\times10^5\ \mathrm{km^2\cdot s^{-2}}$ 的团块，对应 GES 结构 (见图 4 b))。

根据筛选的结果，我们对这两组团块进行了化学丰度的对比与分析，如图 5 所示，可以



注：a) 为聚类算法找出的团块，一种颜色代表一个团块，深红色 x 表示 Sequoia；b) 红色虚线内为 $|L_z| <$ 0.5×10^3 kpc · km · s^{-1}，$1.8 < E < 1.3 \times 10^5$ $km^2 \cdot s^{-2}$，深蓝色表示 GES。

图 4 HDBSCAN 团块筛选图



注：红色表示 Sequoia 的成员星，蓝色表示 GES 的成员星。

图 5 化学丰度分布图

看到左侧团块成员星的 [Fe/H] 基本分布范围为 $-2.0 \sim -1.0$，金属丰度明显低于整体样本，其中，[Mg/Fe]、[Al/Fe]、[Ni/Fe] 明显比中间团块偏低。由密度等高线图可知，这一结果比之前标准下的分布对比更明显，但从分布上看两个结构仍有重叠的部分，没有明显分离开。

5　总结与展望

对于逆向旋转的恒星，通常是认为由吸积所形成。自 Myeong 等人命名 Sequoia 以来[2]，对这个子结构的研究一直持续进行。利用不同的数据样本，在不同的相空间，基于不同的方法，都能探测到 Sequoia 子结构。它在运动学空间中有很明显的特征——逆行、高能。有研究认为 Sequoia 子结构与 GES 子结构不但在运动学空间具有明显的差异，在化学元素丰度模式上也明显不同，但是也有研究认为 Sequoia 在化学空间很难与 GES 分辨出来。我们利用 LAMOST 数据，建立了一个一致性非常好的样本，首先根据文献中的选择标准用这个样本对 Sequoia 进行了成员星的选择，然后利用 LAMOST 提供的化学丰度增值星表分析了 Sequoia 的化学性质。最后，为了得到更加纯粹的 Sequoia 的成员星，我们基于自己的样本，利用 HDBSCAN 方法，经过不断的参数测试，证认出比较可靠的 Sequoia 的成员星，并分析了它的化学性质。总体上，它比 GES 要贫，α、Al 和 Ni 丰度整体展现出比 GES 较低的趋势，但是这个子结构精细的元素丰度模式确定需要高分辨率光谱。我们的工作也为将来的后继高分辨率光谱观测提供观测源。

参考文献：

[1] Feuillet D K, Feltzing S, Sahlholdt C L, et al. MNRAS, 2020, 497(1): 109
[2] Myeong G C, Vasiliev E, Iorio G, et al. MNRAS, 2019, 488(1): 1235
[3] Zhao G, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. RAA, 2012, 12(7): 723
[4] Brown A G A, Vallenari A, Prusti T, et al. A&A, 2021, 649: A1
[5] Abolfathi B, Aguado D S, Aguilar G, et al. ApJS, 2018, 235: 42
[6] Kunder A, Kordopatis G, Steinmetz M, et al. AJ, 2017, 1: 12
[7] Koppelman H H, Helmi A, Massari D, et al. A&A, 2019, 631: L9
[8] Matsuno T, Koppelman H H, Helmi A, et al. A&A, 2022, 661: A103
[9] Feuillet D K, Sahlholdt C L, Feltzing S, et al. MNRAS, 2021, 508(1): 1489
[10] Naidu R P, Conroy C, Bonaca A, et al. ApJ, 2020, 901(1): 48
[11] Conroy C, Bonaca A, Cargile P, et al. ApJ, 2019, 883(1): 107
[12] Horta D, Schiavon R P, Mackereth J T, et al. MNRAS, 2022, 520(4): 5671
[13] Koppelman H H, Bos R O Y, Helmi A. A&A, 2020, 642: L18
[14] Anders F, Khalatyan A, Queiroz A B A, et al. A&A, 2022, 658: A91
[15] McMillan P J. MNRAS, 2017, 465: 76
[16] Dehnen W, Binney J. MNRAS, 1998, 294(3): 429
[17] Li Z, Zhao G, Chen Y, et al. MNRAS, 2022, 517(4): 4875
[18] Wetzel A R. MNRAS, 2011, 412(1): 49
[19] McInnes L, Healy J, Astels S J. Open Source Softw, 2017, 2(11): 205

[20] Helmi A, Tim de Zeeuw P. MNRAS, 2000, 319(3): 657
[21] Helmi A, Veljanoski J, Breddels M A, et al. A&A, 2017, 598: A58

Study on Sequoia Substructure Based on LAMOST

WANG Yu-kun[1,2], ZHAO Jing-kun[1], ZHAO Gang[1,2], CHEN Yu-qin[1,2], ZHANG Hao-peng[1,2], YE Xian-hao[1], YANG Yong[1,2]

(1. CAS Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Sequoia is a retrograde substructure from the accretion event. This paper illustrates the discovery, the criterion of member determination and the chemical properties of this substructure. Moreover, using the data information provided by LAMOST DR8 and Gaia, we compared the chemical abundance of Sequoia and GES according to the previous member star selection criteria. It was found that different selection criteria would affect the analysis to some extent, but there was no obvious boundary between the chemical abundances of Sequoia and GES.

Meanwhile, we used the HDBSCAN clustering algorithm to select the kinematics of the clumps, further analyzed the chemical abundance of the clumps, and obtained a more obvious distribution of Sequoia than the previous comparison. However, we still could not clearly separate the Sequoia and GES from the chemical abundance using the abundance from low-resolution spectra. High resolution spectra data and more accurate selection criteria for further analysis are needed.

Key words: Sequoia; halo; substructure; abundances